

A QDaedalus rendszer kalibrációja

Völgyesi Lajos – Tóth Gyula

DOI: <https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.6.2>

Bevezetés

A QDaedalus rendszer elsősorban asztrogeodéziai mérések felhasználásával függővonal-elhajlások meghatározására használható. Alapeszköze egy GNSS-rendszerrel kiegészített és megfelelőképpen átalakított Leica TCA1800 mérőállomás (Völgyesi–Tóth 2016; Tóth–Völgyesi 2016). A mérőállomás átalakítása az optikai rendszert érinti, a műszer okulárját nagy felbontású és igen nagy érzékenyséű CCD-érzékelőre cseréljük. A GNSS két irányban szolgáltat adatokat: a CCD-érzékelőt és a vezérlő számítógépet a csillagászati felvételek készítéséhez pontos időjellel látja el, továbbá a függővonal-elhajlás számításához meghatározza a WGS84-koordinátákat. A teljes rendszer vezérlését és az adatfeldolgozást a QDaedalus szoftver végzi. Vezérli a mérőállomás mozgását, a távcső fókuszálását, fogadja és feldolgozza a CCD-érzékelő képeit, kezeli a GNSS-adatokat, asztrogeodéziai mérések esetén meghatározza a csillagok, a Nap, a Hold és a bolygók pillanatnyi

topocentrikus koordinátáit, adatbázisba rendezi a kiinduló és a mért értékeket, kiegyenlítéssel a helyszínen meghatározza a keresett függővonal-elhajlási, vagy azimutértékeket. A QDaedalus rendszer vázlatos felépítése az 1. ábrán látható.

A kalibráció alapelve

A mérések kezdetén a legfontosabb lépés a műszer kalibrálása (Völgyesi–Tóth 2016). Ennek során kapcsolatot kell teremteni a mérőállomás vízszintes és magassági körén tett ℓ , z , illetve a CCD-érzékelő koordináta-rendszerében adódó x , y leolvasások között (2. ábra).

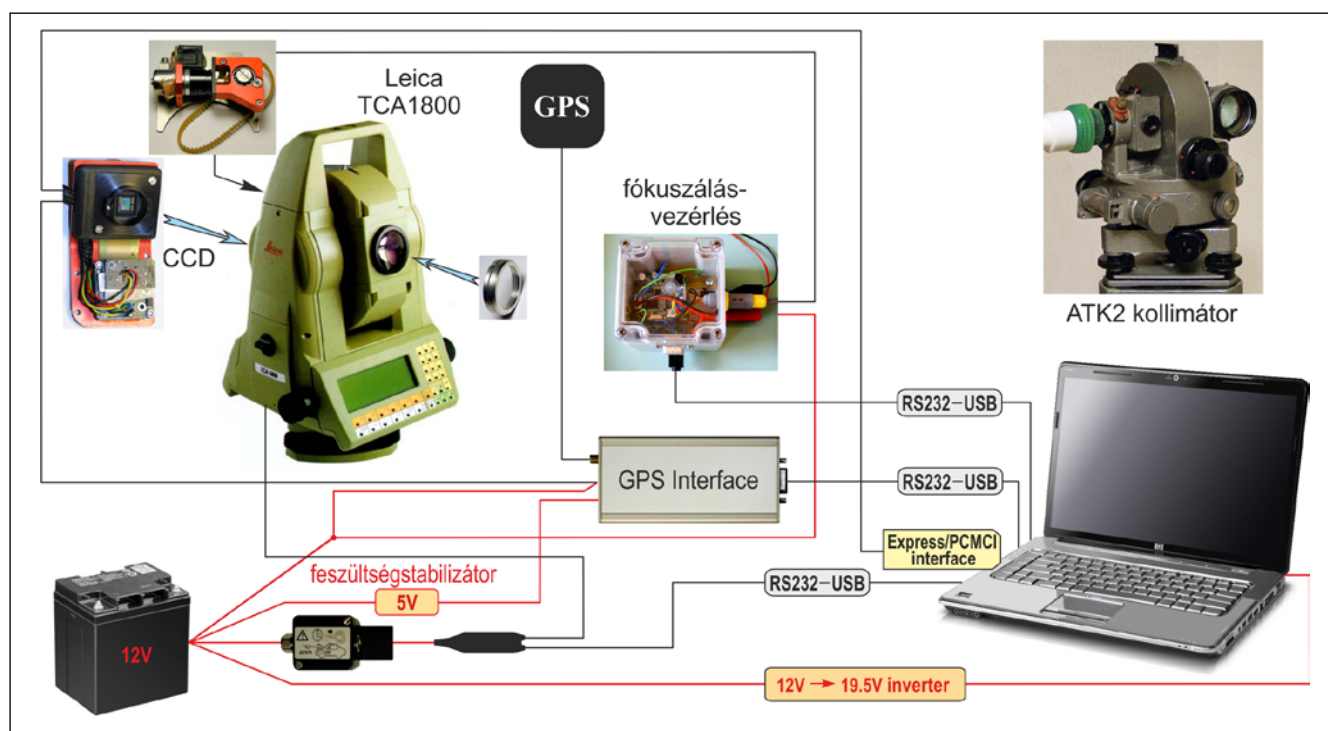
A kalibrálás céljából a mérőállomás szervomotorja a műszer távcsövet a kalibrálásra kiválasztott megírányzott pont (cél tárgy) környezetében – kis lépésekben – körülmozgatja, miközben a vízszintes irányértékek és a zenitszögek leolvasása mellett a CCD-érzékelő is regisztrálja a ponthelyeket. A lehetséges műszerhibák kiküszöbölése és a megfelelő pontosság elérése

céljából ($i = 1, 2, \dots, n$) helyzetben ($j = 1, 2$) távcsőállásban végezzük a kalibrációs méréseket, és rögzítjük az ℓ_{ij} irányértékeket, a z_{ij} zenitszögeket, valamint a képfeldolgozás során meghatározzuk a CCD-érzékelő 2. ábra bal oldalán látható \vec{e}_x, \vec{e}_y koordináta-rendszerében az x_{ij}, y_{ij} értékeket. A CCD-érzékelőhöz definiált koordináta-rendszer kezdőpontja az általa készített kép bal felső sarkában lévő pixelpont közepe, az \vec{e}_x, \vec{e}_y tengelyek pedig egymásra merőlegesek és párhuzamosak a CCD-érzékelő szélével. Az x_{ij}, y_{ij} értékekből az

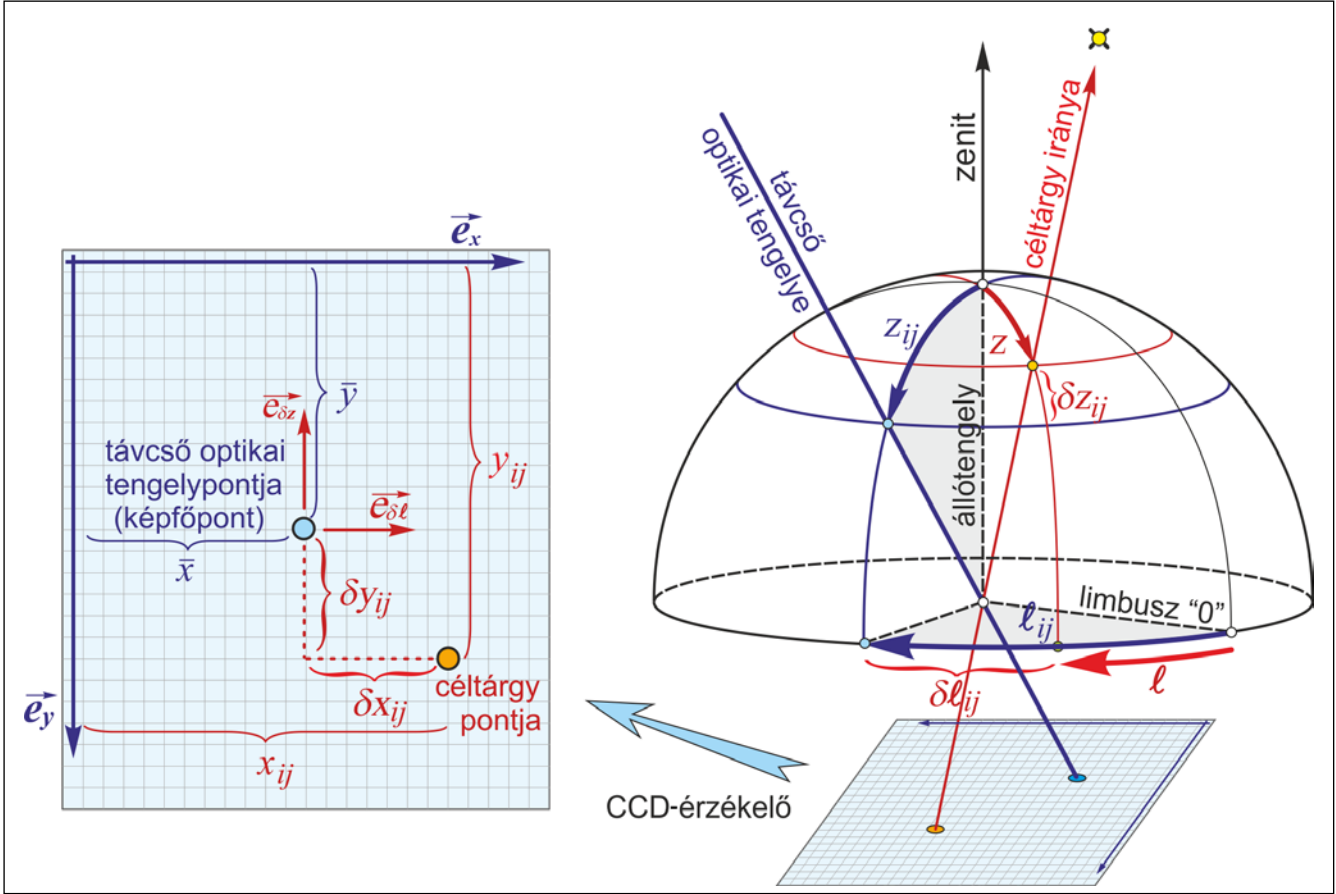
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_{i1} + x_{i2}}{2} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_{i1} + y_{i2}}{2}$$

összefüggésekkel képezhető a kalibráció szempontjából fontos \bar{x}, \bar{y} középpérték (\bar{x}, \bar{y} a távcső optikai tengelypontjának – az ún. *vezérpont* (*képfőpont*) – koordinátái a CCD-érzékelő síkján), amihez viszonyítva meghatározhatók a 2. ábrán látható $\delta x_{ij} = x_{ij} - \bar{x}$, $\delta y_{ij} = y_{ij} - \bar{y}$ eltérések. A CCD-érzékelő koordináta-rendszere és a mérőállomás szögolvasásai közötti kapcsolat az



1. ábra. A QDaedalus rendszer vázlatos felépítése



2. ábra. A kalibráció alapelve

$$\ell_{ij} = \ell + \delta\ell_{ij} = \quad (2)$$

$$= \ell + (1/\sin z_{ij}) [a_{11}(x_{ij} - \bar{x}) + a_{12}(y_{ij} - \bar{y})] \quad (3)$$

$z_{ij} = z + \delta z_{ij} = z + [a_{21}(x_{ij} - \bar{x}) + a_{22}(y_{ij} - \bar{y})]$ összefüggésekkel adható meg (Bürki et al. 2010). Ez egyszerű 6 paraméteres affin transzformáció a két rendszer között, amelyben ha ismerjük az ℓ_{ij} , z_{ij} műszerleolvasásokat és a CCD-érzékelővel meghatározott x_{ij} , y_{ij} értékeket, akkor a (2), (3) alapján, az (1) figyelembevételével, a hat ismeretlen ℓ , z , a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} paraméter meghatározása

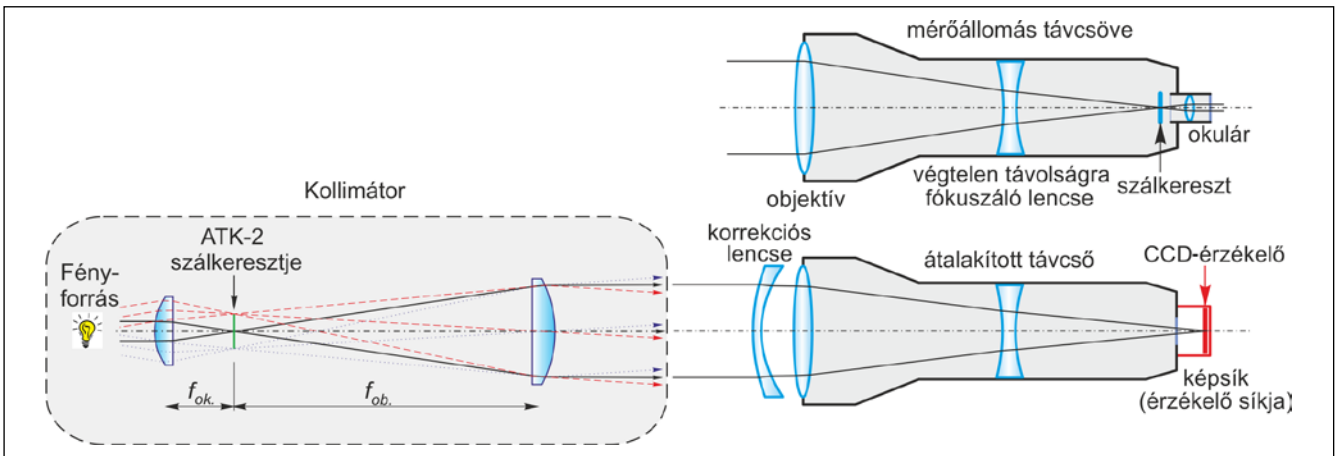
(pl. a legkisebb négyzetek módszerének felhasználásával) egyszerűen megoldható. A kalibrációt a rendszer minden új összeszerelése után, vagy minden olyan esetben újra el kell végeznünk, amikor akár a legkisebb mértékben megváltoztatjuk a CCD-érzékelő helyzetét. Mivel a kalibrációs paraméterek a fókusz állításakor és a hőmérséklet változásával is módosulhatnak (Knobloch 2009; Bürki et al. 2010), ezért vizsgálatokat tervezünk a tényleges mérésekkel egy időben történő meghatározásukra.

Az a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} kalibrációs paraméterek és a vezérpont (képfőpont) \bar{x} , \bar{y} koordinátáinak ismeretében a CCD-leolvasással pontosított ℓ^* , z^* értékek:

$$\ell^* = \ell_i - (1/\sin z_i) [a_{11}(x_i - \bar{x}) + a_{12}(y_i - \bar{y})] \quad (4)$$

$$z^* = z_i - [a_{21}(x_i - \bar{x}) + a_{22}(y_i - \bar{y})] \quad (5)$$

ahol ℓ_i , z_i a mérőállomás vízszintes és magassági körén rögzített leolvasások, x_i , y_i pedig a CCD-érzékelő koordináta-rendszerében meghatározott értékek.



3. ábra. A kollimátor elvi működése és alkalmazása a kalibráció céljára

A kalibráció technikai megoldása

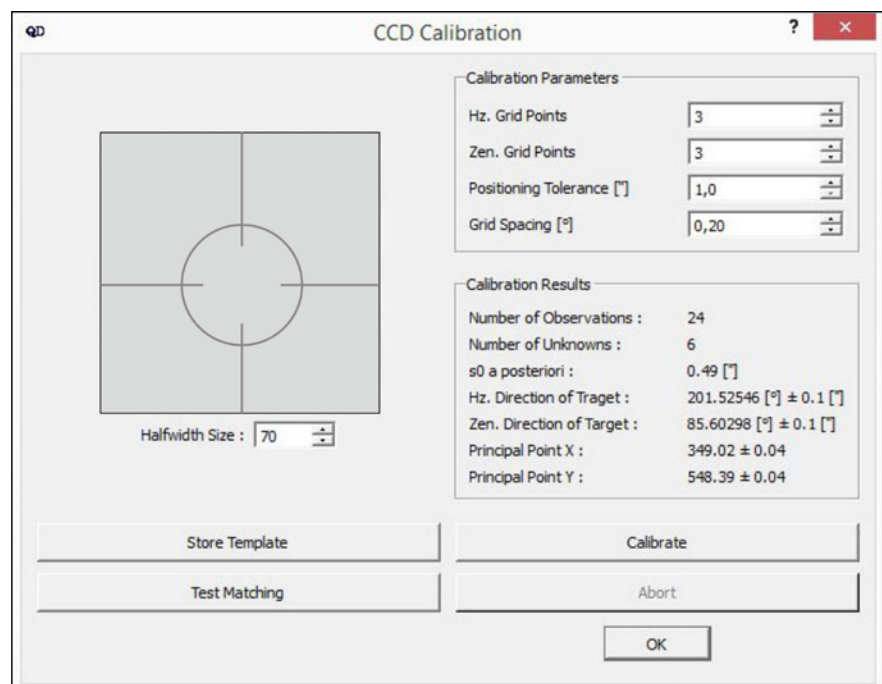
A kalibrációt minden esetben el kell végeznünk, amikor a CCD-érzékelőt felhelyezzük a mérőállomásra, elmozdítjuk, vagy megváltoztatjuk a rögzítését. Csillagászati mérések esetén a mérőállomás parallaxisát végtelenre kell állítani, ezért a kalibrációt is ebben a helyzetben kell elvégezni, mivel a CCD-érzékelőn csak a végtelenben elhelyezkedő tárgyakról alakulhat ki éles kép. A kalibrációhoz kezdetben száz-kétszáz méteres távolságban elhelyezett mozdulatlan LED-diódákat alkalmaztunk, azonban éjszaka, terepi körülmények között ezek megfelelő használata és kezelése igen komoly nehézségekbe ütközött, ráadásul még a több száz méteres távolságban elhelyezett fényforrásokról sem alakult ki teljesen éles kép a CCD-érzékelőn. Megpróbáltuk a kalibrációhoz az α Ursa Minor (Poláris) csillagot is használni, azonban a mozgása miatt ez sem volt alkalmas a pontos kalibrációra mivel nem pontosan a Föld forgástengelyének irányában található, és a kalibráció során elmozdul a képe a CCD-érzékelőn. Ezek után olyan megoldást kellett keresnünk, amely terepi körülmények között éjszaka is alkalmas az egyszerű és pontos kalibrációra.

A problémát kollimátor alkalmazásával sikerült megoldanunk, amelynek alapelvét a 3. ábrán láthatjuk.

A kollimátorunk olyan segédtávcső, mely az okulár oldali fókuszpontjában elhelyezett tárgyról olyan párhuzamos fénysugarakat állít elő, mint amilyen párhuzamos fénysugarak a végtelen távoli tárgyakról (csillagokról) érkeznek a műszerünkbe. A kalibrációs mérések céljára készített 4. ábrán látható kollimátorunk egy megfelelően átalakított ATK-2 csillagászati műszer, amelynek parallaxisa rögzítetten végtelenre van állítva. Az ATK-2 műszerben kalibrációra alkalmas tárgy a fókuszpontban elhelyezett szátkereszt, amely megvilágítására speciális LED-világítást készítettünk. Az 5. ábrán a QDaedalus szoftver kalibrációs ablakában kalibrációs jelként az ATK-2 műszer szátkeresztjének képe látható.



4. ábra. Az ATK-2 kollimátor és a kollimátoros kalibrálás laboratóriumi testje



5. ábra. A vezérlőszoftver kalibrációs ablaka és benne a kollimátor szátkeresztje mint kalibrációs jel

A kalibrációs mérések optimális száma

A kalibráció legfontosabb kérdése a kalibrációs mérések optimális száma. A mérések számának növelésével fokozható a képfőpont \bar{x} , \bar{y} koordinátáinak, valamint a meghatározandó a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} kalibrációs paraméterek pontossága, ugyanakkor a nagyobb pontosságért a hosszabb mérési idővel kell fizetnünk. A kérdés tehát az, hogy mennyi mérést kell elvégeznünk ahhoz, hogy a lehető legrövidebb idő alatt elérjük a szükséges pontosságot? Legalább három mérésre biztosan szükségünk van, mivel ha két mérés jelentősen eltér egymástól, nem lehet eldönteni, hogy melyik a hibás.

A vizsgálatokhoz ötven kalibrációs mérést végeztünk a kollimátor szátkeresztjére a CCD-érzékelő ugyanazon rögzített helyzetében, azonos hőmérsékleten és változatlan optikai beállítás (parallaxis) mellett, 3×3 méretű kalibrációs mátrix pontjaiban. Az ötven mérésből meghatároztuk a CCD-érzékelőn a képfőpont koordinátáinak középértékét. A 6. ábrán a képfőpontok és hibaellipsziseik eloszlása látható a CCD-érzékelőn, a középső kereszt pedig a képfőpont átlagos helyzetét mutatja. Az egyes kalibrációs mérések középpontjain az 50 mérésből számítható átlagos képfőpont-középpont x és y irányban is $\pm 0,02$ pixel.

Az 50 kalibrációs mérésből a mérések optimális számának megállapításához véletlenszerűen kiválasztottunk 25, 10, 5, és 3 mérést tartalmazó csoportokat 10-10 különböző kombinációban, majd mindegyik csoportban meghatároztuk a képfőpont átlagos helyzetét és ennek eltolódását az 50 mérésből adódó képfőpont átlagos helyéhez viszonyítva. Kiszámítottuk az egyes kalibrációk, illetve kalibrációs csoportok által meghatározott képfőpont koordinátáinak középhibáit is, amelyeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. A táblázat adatai alapján látható a mérésszám csökkentésével a középhibák növekedése.

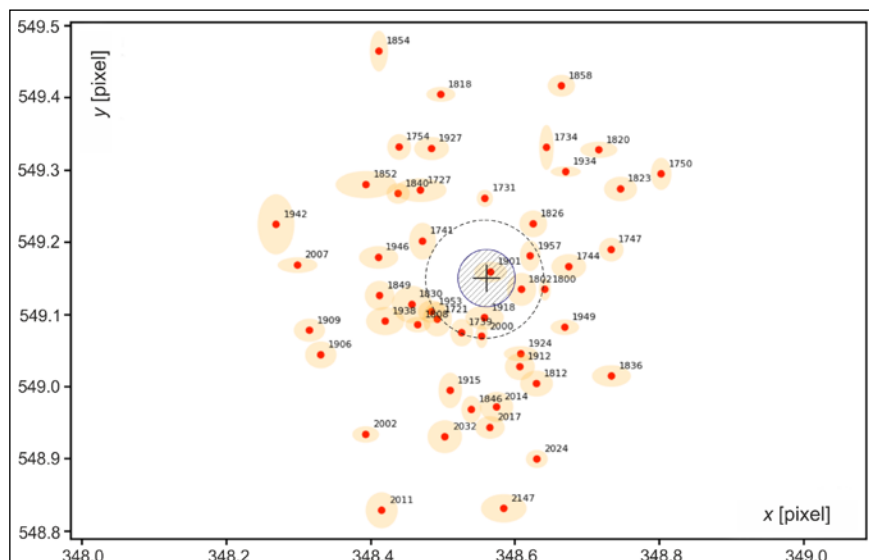
1. táblázat. A képfőpontok középhibáinak változása a mérésszám függvényében.

mérésszám	x [pixel]	y [pixel]
50	0,02	0,02
25	0,02	0,03
10	0,04	0,04
5	0,05	0,05
3	0,06	0,08

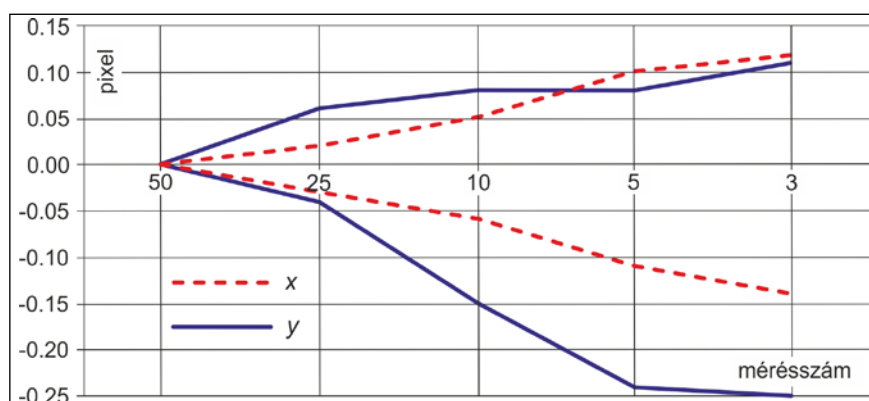
A kalibrációs mérések optimális számának meghatározásához fontos információ, hogy az egyes mérési csoportokban mekkorák az 50 mérésből kialakított képfőpont koordinátiához képest a legnagyobb pozitív és negatív eltérések. A 7. ábrán látható diagram azt mutatja, hogy a kalibrációs mérések számának csökkenésével egyre jobban nő a képfőpontok koordinátáinak eltérése az 50 mérésből meghatározott értékhez viszonyítva.

Vizsgálataink alapján megállapítható, hogy ötnél kevesebb mérés esetén már nem várható a féltized pixel alatti pontosság sem. A 6. ábra tanúsága szerint a képközéppontok a srafkozott belső körön belül várhatóan 10 vagy ennél magasabb ismétlésszám esetén, míg 5 ismétlésszám alatt már nagy eséllyel a szaggatott körön kívüli területre is eshetnek a pontok.

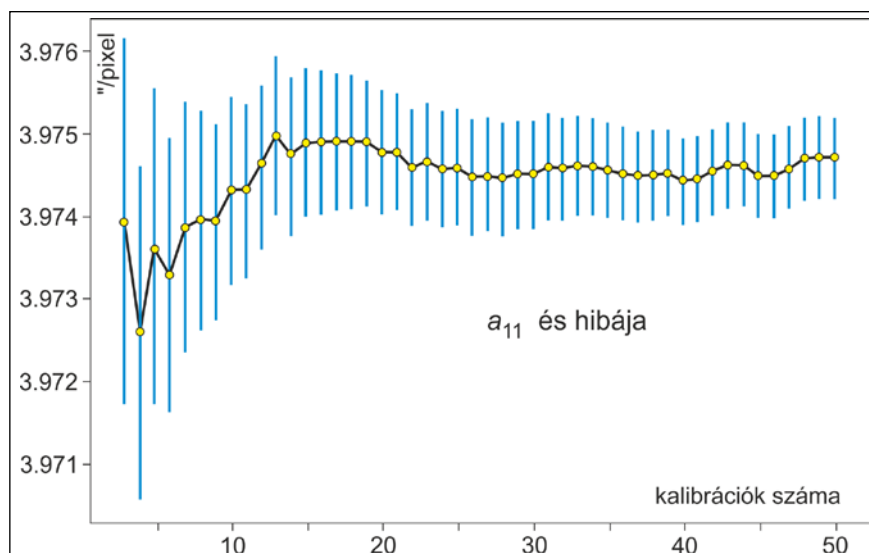
Hasonló eredményre jutunk az a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} kalibrációs paraméterek vizsgálata során is. A QDaedalus szoftver a képfőpont \bar{x} , \bar{y} koordinátái mellett a (2) és a (3)-ban szereplő a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} kalibrációs paramétereket is meghatározza. Külön megvizsgáltuk az egyes kalibrációs paraméterek értékének és hibájának változását a kalibrációs mérések számának függvényében.



6. ábra. Képfőpontok és hibáik eloszlása a CCD-érzékelőn. A középső kereszt a képfőpont átlagos helye.



7. ábra. A legnagyobb pozitív és negatív eltérések a kalibráció számának csökkentése esetén x és y irányban az 50 kalibrációs mérés átlagos képfőpontjához viszonyítva.



8. ábra. Az a_{11} kalibrációs paraméter értékének és hibájának változása a kalibrációs mérésszám függvényében.

A 8. ábrán példaképpen az a_{11} paraméter értékének és hibájának változása látható a kalibrációk számának növekedésével 1-től 50-ig. A vizsgálatainkból

megállapítható, hogy kezdetben a kalibrációs paraméterek értéke nagy hibával jelentősen változik, viszont kb. a 12.-13. méréstől már felvesznek

egy olyan értéket, ami a későbbiekben alig változik, és innen már a meghatározás hibája is kisebb és csak nagyon keveset javul. Gyakorlatilag ugyanez jellemző az a_{12} , a_{21} , a_{22} kalibrációs paraméterekre is.

Összegezőképpen a vizsgálataink alapján megállapítható, hogy a QDaedalus rendszer használata során legalább 10 kalibrációs mérést érdemes csinálni, viszont 15-nél több mérés már nem javítja számottevően az eredményeket, tehát a 10-15 közötti kalibrációs mérés látszik a legjobb kompromisszumnak a pontosság és a hozzá szükséges mérési idő tekintetében.

Az optimális kalibrációs mátrixméret

A kalibrálás céljából a mérőállomás szervomotorja a műszer távcsövét a kalibrálásra kiválasztott megírányzott pont (céltárgy) környezetében kis lépésekben, meghatározott sorrendben körülmozgatja. A CCD-érzékelő kalibrációs mérésbe bevont területe a kalibrációs mátrix mérete és a rács távolság függvényében változtatható.

A QDaedalus szoftver alapértelmezésben 3×3 méretű kalibrációs mátrix pontjai mentén a 9. ábra középső részén mutatott sorrendben mozgatja végig a műszer távcsövét az első és a második távcsőállásban. A rács távolság alapértelmezésben 0,2 fok, amivel a CCD-érzékelő nagyobb területét vonjuk be a kalibrációba. Választhatunk más rács távolságot is, pl. 0,05 fok esetén a CCD-érzékelőnek csak azt a kisebb, középpont körüli részét vonjuk be a vizsgálatba, ahova egyébként általános esetben a mérés során a csillagok leképződnek.

Lehetőség van a CCD-érzékelő kérdéses területének finomabb felbontású kalibrációs vizsgálatára is a mátrix méretének növelésével és a rács távolság csökkentésével. A 9. ábra jobb oldali részén példaként a 4×4 méretű kalibrációs mátrix mérési pontjainak elhelyezkedését és a távcső mozgatósi sorrendjét láthatjuk.

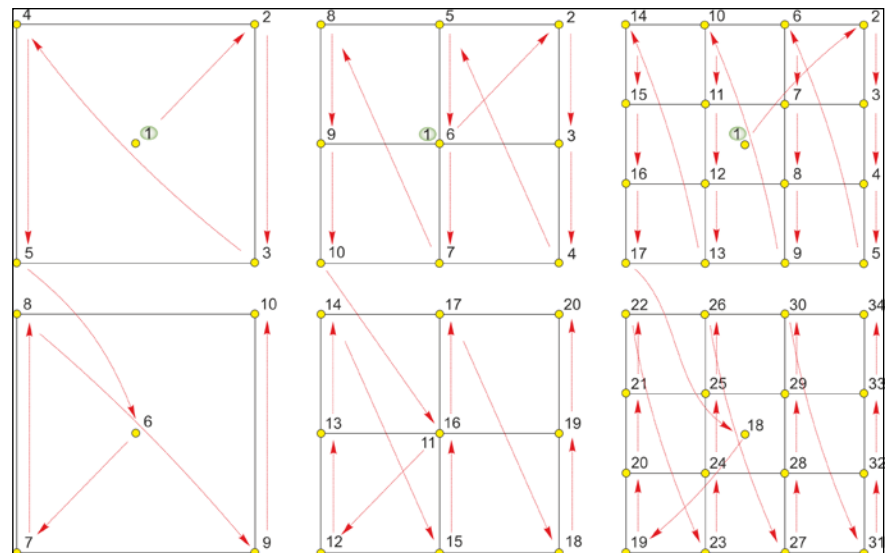
Vizsgálataink során arra kerestünk választ, hogy többször ismételt mérésekkel kisebb (pl. 2×2) méretű, vagy kevesebb ismétléssel, de nagyobb (pl. 4×4) méretű kalibrációs mátrixra

végzett méréssel jutunk-e jobb eredményre. Méréseinket a 9. ábrán látható 2×2 , 3×3 , 4×4 , valamint 5×5 és 6×6 méretű kalibrációs mátrixokra is elvégeztük úgy, hogy közben a rács távolság változtatásával a CCD-érzékelőnek ugyanarra a területére korlátoztuk a méréseinket. Az 5×5 és 6×6 méretű rács pontok mentén mérve már a mérések kezdetén nyilvánvalóvá vált, hogy ezekben az esetekben csak a mérési időtartam növekszik meg jelentősen, bármiféle pozitív hozadék nélkül, ezért ezekkel a lehetőségekkel a továbbiakban nem foglalkozunk.

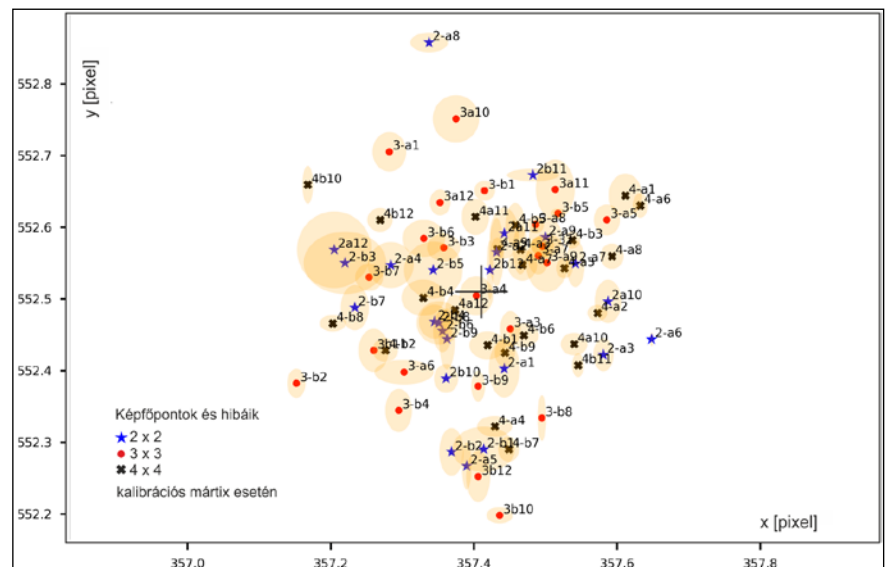
Kalibrációs méréseinket úgy végeztük, hogy minden változatban 2×12 (összesen 72) mérést végeztünk 2×2 , 3×3 , 4×4 , majd újból 2×2 , 3×3 , 4×4

méretű esetek sorrendjében. A különböző kalibrációs mátrixok esetére vonatkozó vizsgálataink eredményeit (a képfőpontok területi eloszlását) a 10. ábrán mutatjuk be, a számszerű eredményeket pedig a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A 10. ábrán látható, hogy a képfőpontok elrendeződésében semmiféle szabályszerűség nem mutatkozik, a különböző felbontású kalibrációs mátrixokra vonatkozó mérések eredményei véletlenszerűen keverednek, a kereszttel jelölt átlagos helyzetű képfőpont körül egyformán szóródnak. Ezt alátámasztják a 2. táblázat adatai is, amelyek szerint a kalibrációs mátrix méretének növelésével a képfőpont helyzete mindössze



9. ábra. A távcső kalibrációs mozgatója 2×2 , 3×3 és 4×4 méretű mátrix sarokpontjai mentén I. és II. távcsőállásban



10. ábra. Képfőpontok és hibáik 2×2 , 3×3 és 4×4 méretű kalibrációs mátrix esetén

2. táblázat.

A képfőpont helyzete és hibái a kalibrációs mátrix méretének függvényében.

Mátrixméret	Képfőpont helyzete és hibái				Legnagyobb + és - eltérések				
	x [pixel]	m _x	y [pixel]	m _y	Δx_{\max}	Δx_{\min}	Δy_{\max}	Δy_{\min}	t [sec]
Összes	357,41	±0,04	552,51	±0,05	0,26	-0,24	0,26	-0,24	-
2x2	357,40	±0,05	552,50	±0,05	0,20	-0,25	0,21	-0,17	85
3x3	357,43	±0,03	552,49	±0,04	0,28	-0,18	0,29	-0,16	140
4x4	357,44	±0,03	552,51	±0,04	0,24	-0,19	0,22	-0,15	180

századpixel nagyságrenddel változik és az átlagos képfőpont helyzetéhez viszonyított legnagyobb pozitív és negatív eltérésekben sincs számottevő különbség. Ugyanakkor jelentős különbség van a mérési időben, a táblázat utolsó oszlopában egy-egy kalibrációs mérés teljes időtartama látható (a teljes időtartamba beletartozik az adott kalibrációs mérés paramétereinek beállítása, a tényleges mérés időtartama és az adatok mentése ellenőrzéssel). Látható tehát, hogy a 2×2 mátrixméret esetében a mérés szükséges időtartama 1 perc 25 sec, a 3×3 esetben 2 perc 20 sec és a 4×4 esetben 3 perc, (5×5 mátrixméret esetén már közel 5 perc).

Összességében megállapítható tehát, hogy a kalibrációs mátrix méretének növelése a mérés időtartamának jelentős növekedése ellenére sem eredményezi a képfőpont helyzete pontosságának szignifikáns növekedését. Megfelelő tehát a 2×2 méret, de a 4×4-es méret alkalmazása biztosan fölösleges. Az optimális megoldás tehát a kis mátrixméret mellett a mérésszám növelése.

Hőmérsékletfügés

A hőmérséklet változása a lineáris hőtágulás elméletének megfelelően mind az optikai rendszer, mind a CCD-érzékelő és rögzítésének apró deformációit okozza, ami következtében várható a képfőpont helyzetének megváltozása. A kérdés a változás mértéke, illetve, hogy ez mekkora hibát okoz a rendszer működésében? A méréseket tág hőmérsékleti tartományban, -1 és +23°C között végeztük, mindvégig gondosan ügyeltünk a CCD-érzékelő változatlan helyzetére, és közben a végtelenre fókuszáló parallaxiscsavar állását sem változtattuk meg. A méréseinket téli napokon végeztük, a kalibrációt minden esetben először fűtött helyiségben +23°C hőmérsékleten kezdtük, majd a méréseket külső

térben alacsonyabb (+9, +8, +7, +6, +5, +4 és -1°C) hőmérsékleteken folytattuk. Fontos szempont volt, hogy a külső mérések megkezdése előtt minden esetben legalább egy órát pihentettük a mérőberendezést, hogy teljes egészében átvegye a külső, alacsonyabb hőmérsékletet.

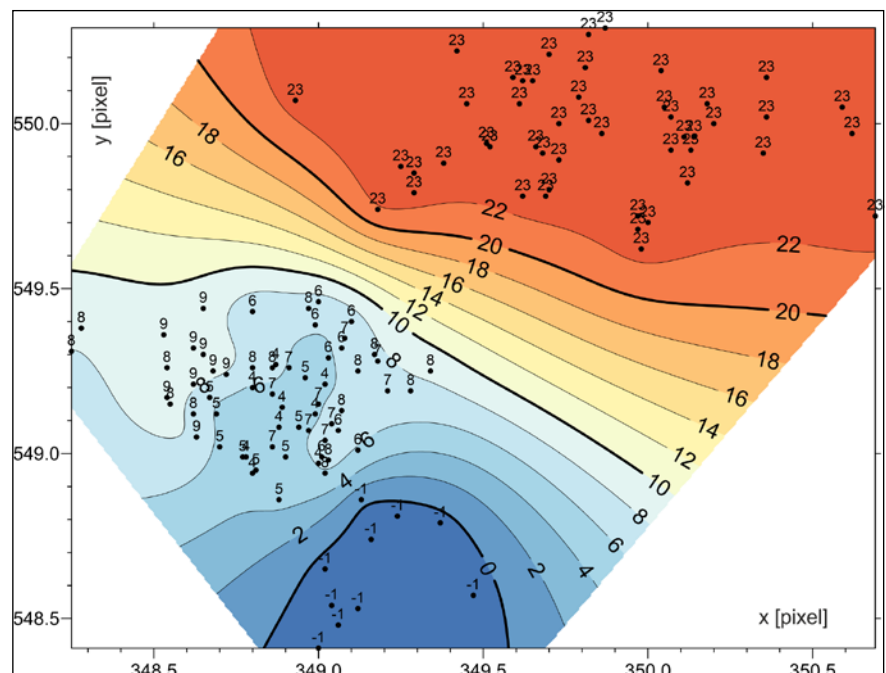
A mérési eredményeket a 11. ábrán szemléltetjük, ahol a képfőpont helyzetének változását láthatjuk a hőmérséklet-változás függvényében. A képfőpontok helyzetét mutató fekete pontok melletti számok az adott pixelhelyzethez tartozó hőmérsékleti értékeket mutatják, a hőmérsékleti izovonalak pedig azokat a területeket veszik közre, ahol adott hőmérséklet mellett a képfőpontok találhatók.

Megállapítható, hogy csökkenő hőmérséklet mellett a CCD-érzékelőn egyértelműen eltolódik a képfőpont helyzete x és y irányban is az alacsonyabb értékek felé. Az eltolódás mértéke jelentős, 20 fokos hőmérséklet-különbség esetén legalább 1 pixel. Ugyanakkor a 11. ábra középső részén megfigyelhető, hogy kisebb, 1-2 fokos

hőmérséklet-változás esetén már egymásba csúsznak a képfőpontok, vagyis 1-2 fokos hőmérséklet-változás által okozott hiba már belecsúszik az egyéb véletlenszerű hibák mérési zajába.

Az éjszakai csillagászati mérések során a derült idő és a magas kisugárzás természetes következménye a fokozatos hőmérséklet-csökkenés. A csökkenés kezdetben gyors, óránként több fok is lehet. A kalibráció kezdete és a csillagászati mérés befejezése közötti rövidebb mérési időtartam alatt a levegő csökkenő hőmérséklet-változása még nem okoz számottevő problémát (a hőmérséklet-változás okozta hiba beleolvad az ismeretlen általános mérési zajba), viszont hosszabb mérési időtartam, vagy gyors hőmérséklet-csökkenés már a mérési zajból kiemelkedő jelentősebb mérési hibákat okoz.

A hőmérsékleti vizsgálatainkból levonható legfontosabb következtetés, hogy fűtött helyiségből alacsonyabb hőmérsékletű terepi mérésekre kiszállítva a műszereket, a mérés megkezdése előtt meg kell várni, hogy a



11. ábra. Képfőpont helyzetének változása a hőmérséklet-változás függvényében

műszerek (a műszerek belső optikai szerkezete is) teljesen átvegyék a külső hőmérsékletet. A teljes hőmérsékleti egyensúly kialakulásához elsősorban télen, nagy hőmérséklet-különbségek esetén hosszabb időtartam szükséges, ami akár egy óra is lehet.

Ugyanazon ponton a kalibráció kezdete és a csillagászati mérés befejezése között eltelt időben nem lehet 1-2 foknál nagyobb a hőmérséklet-változás. Jelentősebb éjszakai lehűlés (hőmérséklet-csökkenés) esetén célszerű a csillagászati mérés előtt és után is kalibrációs méréseket végezni és a kettő átlagából kiszámítani a képfőpont helyzetét és az a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} paramétereket. Emiatt a mérések során fontos a hőmérséklet-változás folyamatos figyelése.

Összefoglalás

A QDaedalus csillagászati-geodéziai mérések kezdetén a legfontosabb lépés a műszer kalibrálása, mely során kapcsolatot kell teremteni a mérőállomás vízszintes és magassági körén, illetve a CCD-érzékelő koordináta-rendszerében adódó leolvasások között. A kalibrálás céljából a mérőállomás szervomotorja a műszer távcsövét a kalibrálásra kiválasztott céltárgy (a megírányzott pont) környezetében kis lépésekben, meghatározott sorrendben körülmozgatja a kalibrációs mátrix pontjai mentén. A kalibráció alapelveinek tisztázását követően foglalkoztunk a kalibrálás gyakorlati megoldási problémáival, majd a problémák megoldására kollimátor alkalmazásával új, egyszerű és pontos technikai megoldást mutattunk be.

A méréseink és vizsgálataink során foglalkoztunk a kalibrációs mérések optimális számával, az optimális kalibrációs mátrixméret meghatározásával és a hőmérséklet változásának hatásával.

Vizsgálataink alapján megállapítottuk, hogy a QDaedalus rendszer használatánál legalább 10 kalibrációs mérést érdemes végezni, ugyanakkor 15-nél több mérés már nem javítja számottevően az eredményeket, tehát a 10-15 közötti kalibrációs mérés látszik a legjobb kompromisszumnak a pontosság és a hozzá szükséges mérési idő tekintetében.

A CCD-érzékelő kalibrációs mérésbe bevont területe a kalibrációs mátrix mérete és a rácsávolság függvényében változtatható. Megállapítottuk, hogy a kalibrációs mátrix méretének növelése a mérés időtartamának jelentős növekedése ellenére sem eredményezi a képfőpont helyzete pontosságának szignifikáns növekedését. Megfelelő tehát a 2×2 és a 3×3 mátrixméret, de a 4×4 -es méret alkalmazása már fölösleges. Az optimális megoldás a kis mátrixméret mellett a mérésszám növelése.

Megvizsgáltuk azt is, hogy a hőmérséklet változása mekkora hibát okoz a rendszer működésében. Megállapítottuk, hogy a kalibráció kezdete és a csillagászati mérés befejezése között eltelt időben nem lehet 1-2 foknál nagyobb a hőmérséklet-változás. Intenzív éjszakai lehűlés (hőmérséklet-csökkenés) esetén célszerű a csillagászati mérés előtt és után is kalibrációs méréseket végezni, és a kettő átlagából kiszámítani a képfőpont helyzetét és a transzformációs paramétereket. A hőmérsékleti vizsgálatainkból levonható további fontos következtetés, hogy fűtött helyiségből alacsonyabb hőmérsékletű terepi mérésekre kiszállítva a műszereket, a mérés megkezdése előtt meg kell várni, hogy a műszerek (a belső optikai szerkezet is) teljesen átvegyék a külső hőmérsékletet, vagyis beálljon a teljes hőmérsékleti egyensúly.

Köszönetnyilvánítás. A kutatások a K-124286 sz. OTKA támogatásával folynak.

Irodalom

- Bürki, B. – Guillaume, S. – Sorber, P. – Oesch, H. P. 2010. DAEDALUS: A Versatile Usable Digital Clip-on Measuring System for Total Stations. 2010 *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 15–17 September, Zürich, Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPIN.2010.5646270>
- Knobloch, S. 2009. Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängtachymeters. *Dissertation, Techn. Univ. Dresden*.
- Tóth, Gy. – Völgyesi, L. 2016. Data processing of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering* 5 évf. 8. sz. pp. 149–166.
- Völgyesi, L. – Tóth, Gy. 2016. A QDaedalus-rendszer geodéziai alkalmazási lehetőségei. *Geodézia és Kartográfia* 68. évf. 9–10 sz. pp. 11–17.

Summary

QDaedalus system is a computer-controlled automated geodetic total station completed with GNSS technology which can be used mainly for astrogeodetic measurements. Before the measurements, the most important step is to calibrate the instrument. Accordingly, it is necessary to establish a connection between the readings on the horizontal and vertical circle of the total station and the readings in the coordinate system of the CCD sensor. By the previous procedure at night in field conditions, the calibration was rather cumbersome and did not meet the exact measurement accuracy. To solve this problem, we have developed a new method and tool for calibrating more easily and more accurately. Studies were performed on the optimal calibration measurements and raster size; additionally, the temperature dependence of the measurements was also investigated. Our experiences are useful in all cases when installing a CCD sensor for geodetic instruments.

Kulcsszavak: kalibráció, mérőállomás, CCD érzékelő, kollimátor, asztrogeodéziai mérések, QDaedalus
Keywords: calibration, total station, CCD sensor, collimator, astrogeodetic measurements, QDaedalus



Dr. Völgyesi Lajos
 professor
 emeritus

BME Általános- és Felsőgeodézia
 Tanszék
 volgyesi@eik.bme.hu
<http://www.agt.bme.hu/volgyesi>



Dr. Tóth Gyula
 egyetemi
 docens

BME Általános- és Felsőgeodézia
 Tanszék
 gtoth@sci.fgt.bme.hu
<http://www.agt.bme.hu/volgyesi>